

Optimierung von Vertäueinrichtungen und Hafenstrukturen durch dynamische Berechnung der Vertäulasten

Optimierung von Vertäueinrichtungen und Hafenstrukturen durch dynamische Berechnung der Vertäulasten

by Oliver Stoschek¹, Stefan Leschka², Christian Hein³ and Anja Brüning⁴

1. Einleitung

In vielen Häfen wurden die Vertäueinrichtungen bereits vor vielen Jahren oder Jahrzehnten geplant und gebaut. Sie sind, verglichen mit den heute fahrenden Schiffen, für deutlich kleinere Einheiten ausgelegt worden. Die Schiffsgrößen haben sich seitdem rasant verändert, so dass heute deutlich höhere Schiffe mit über 400 m Länge in den Häfen vertäut werden müssen. Viele existierende Vertäueinrichtungen, die internationalen Richtlinien (PIANC, OCIMF) und die lokalen Richtlinien (z.B: EAU) sind für kleinere Schiffseinheiten ausgelegt und

halten mit dieser Entwicklung nicht Schritt. Die Anwendung der Richtlinien kann zu einer deutlichen Überdimensionierung führen.

Zur Ermittlung der tatsächlichen Vertäukräfte und zur Dimensionierung bestehender oder neuer Vertäueinrichtungen können dynamische Vertäubechnungen eine effektive Hilfe zur Ermittlung realistischer Belastungen darstellen. Kurzfristig kann die Methode helfen, bestehende Vertäueinrichtungen zu analysieren, Schwachpunkte zu identifizieren und die Lebensdauer der Anlagen zu verlängern.

DHI hat eine entsprechende Software zur Berechnung der dynamischen Trossenkräfte entwickelt (MIKE 21 Mooring Analysis (MA), DHI, 2017). Im Vergleich zu anderen Produkten können zusätzlich zu dynamischen Windfeldern auch zweidimensionale Strömungs- und Wellenfelder berücksichtigt werden, deren Betrachtung in Häfen einen wichtigen Einfluss auf die Ergebnisse haben kann. Die



Abbildung 1: Übersicht der Projektgebiete

- 1 DHI WASY GmbH, Niederlassung Bremen, Knochenhauerstr. 20-25, 28195 Bremen, oliver.stoschek@gmx.de
- 2 DHI WASY GmbH, Niederlassung Bremen, Knochenhauerstr. 20-25, 28195 Bremen, sle@dhigroup.com
- 3 Bremenports GmbH & Co. KG, Am Strom 2, 27568 Bremerhaven, christian.hein@bremenports.de
- 4 Sellhorn Ingenieurgesellschaft mbH, Teilfeld 5, 20459 Hamburg, anja.brueining@gmx.de

Optimierung von Vertäueinrichtungen und Hafenstrukturen durch dynamische Berechnung der Vertäulasten

Software wurde bereits in zahlreichen Studien weltweit angewendet. Drei Beispiele aus Deutschland (Bremerhaven, Wilhelmshaven und Hamburg) werden hier vorgestellt. Eine Übersicht über die Projektgebiete ist in Abbildung 1 gegeben.

In Bremerhaven wurde eine dynamische Vertäuberechnung für besondere Schiffsformen unter Berücksichtigung vorbeifahrender Schiffe durchgeführt. In Wilhelmshaven bestimmen Schiffspassagen und Strömungen die Trossenkräfte. Wind ist in Hamburg die größte Kraft, die auf neuartige Containerschiffe (VLC, ULC, etc.) wirkt. Die Berechnung der dynamischen Trossenkräfte in den Beispielen führt zu genaueren und vielfach im Vergleich zur EAU geringeren Bemessungsgrößen für die Vertäueinrichtungen. In dieser Veröffentlichung wird die Methodik der dynamischen Vertäuanalyse und die Anwendung auf die genannten Beispiele beschrieben.

2. Dynamische Vertäuanalyse

Die hydrodynamische Interaktion von schwimmenden Körpern und dem Wasserkörper wird hinreichend genau mit der linearen Theorie der Potentialströmung beschrieben. Dieser Ansatz ist gültig, solange $\frac{kA}{\tanh(kh)} \ll 1$, wobei A die Wellenamplitude, k die Wellenzahl und h die Wassertiefe

ist. Es wird weiterhin angenommen, dass die Bewegung des schwimmenden Körpers klein ist, was durch das Vertäusystem gewährleistet wird. Weiterhin wird angenommen, dass vernachlässigte hydrodynamische Effekte durch empirische Koeffizienten in die Berechnung einbezogen werden können.

Unter diesen Annahmen kann die Bewegungsgleichung

$$\sum_{k=1}^6 (M_{jk} + a_{jk}) \ddot{x}_k(t) + \int_0^t K_{jk}(t-\tau) \dot{x}_k(\tau) d\tau + C_{jk} x_k(t) = F_{jD}(t) + F_{jni}(t) \quad (1)$$

im Zeitbereich gelöst werden. Linkerhand beschreibt der erste Term die Trägheitskräfte, der zweite Term die hydrostatischen Kräfte und der dritte Term die hydrodynamischen Kräfte erster Ordnung infolge der Wellensteilheit (Bingham, 2000). Sie werden als Impuls-Resonanz-Funktionen (IRF's) bezeichnet. Die Matrizen M_{jk} , C_{jk} und K_{jk} sind 6x6-Matrizen des schwimmenden Körper-Systems. M_{jk} und C_{jk} sind dabei die Trägheitsrückstell-Matrix und die hydrostatische Rückstell-Matrix. a_{jk} sind Impuls-Beiträge (zusätzliche Masse), die aus der $t = 0$ -Bedingung des Streuungsproblems herrühren. Die Kräfte aus

den gestreuten Wellen, die durch die Körperbewegung induziert werden, werden als Faltung der Streuungs-IRF K_{jk} ausgedrückt. Rechterhand, sind alle nicht-linearen externen Kräfte zusammengefasst, wie z.B. die des Vertäusystems, die der viskosen und Reibungsdämpfung (Froude-Krylov-Kraft) $F_{jni}(t)$ und die der Wellenanregungskräfte durch die Streuung der einlaufenden Welle $F_{jD}(t)$.

Der Verschiebung und die Winkeländerung des schwimmenden Körpers in den sechs Freiheitsgraden (DOF) $x_j(t)$ sind in kartesischen Koordinaten ausgedrückt, wobei $x_1=x$ die longitudinale Schiffsachse (nach vorn zeigend) beschreibt. Die Verschiebungen des Körpers sind demnach $x_1 =$ wogen, $x_2 =$ schwoien und $x_3 =$ tauchen. Die Rotationen sind $x_4 =$ rollen, $x_5 =$ stampfen und $x_6 =$ gieren. Die Punkte über den Parametern kennzeichnen deren zeitliche Differentiation an (Bingham, 2000).

Der zweite Term in Gleichung (1) allein macht die Berechnung der Matrizen $K_{jk}(t)$, $a_{jk}(t)$ jedoch durch die Faltung im Zeitbereich ineffizient. Daher werden diese hydrodynamischen Berechnungen im Frequenzbereich durchgeführt.

Die hydrodynamischen Koeffizienten im Frequenzbereich werden Frequenz-Resonanz-Funktionen (FRF) genannt:

Hierin sind $F_{jD}^*(\omega)$ die Anregungskräfte als Funktion

$$\sum_{k=1}^6 \{-\omega^2 [M_{jk} + A_{jk}(\omega)] + i\omega B_{jk}(\omega) + C_{jk}\} \tilde{x}_k(\omega) = \tilde{F}_{jD}(\omega), j = 1,2, \dots, 6 \quad (2)$$

der Wellenfrequenz. ω , $x_k^*(\omega)$ ist der Einheitsvektor für die sechs Freiheitsgrade (Degrees of Freedom DOF). Eine vollständige Streu-Analyse des Körpers wird durchgeführt, indem die zusätzliche-Masse-Koeffizienten-Matrix $A_{jk}(\omega)$ als reeller Teil und die Dämpfungs-Koeffizienten-Matrix $B_{jk}(\omega)$ als imaginärer Teil des Streuungspotentials $\varphi_j(\omega)$ gleichverteilter Frequenzen über die signifikante Frequenzbandbreite berechnet werden (einschließlich $\omega=0, \infty$).

Das Streuungspotential wird mit Hilfe der Randlelementmethode ermittelt. Die Wellenanregungskräfte werden durch die Streuungspotentiale des Bousinesq-Wellenfeldes über die Haskind-Beziehung ausgedrückt. Alle Transformationen aus dem Frequenzbereich in den Zeitbereich werden durch die schnelle Fouriertransformation durchgeführt. Wellenabtriebskräfte zweiter Ordnung werden durch die Newman-Näherung (Newman, 1977) berechnet. Für zusätzliche Details wird auf Babarit & Delhommeau (2015) und DHI (2018) verwiesen.

Optimierung von Vertäueinrichtungen und Hafenstrukturen durch dynamische Berechnung der Vertäulasten

MIKE 21 MA berücksichtigt in jedem Zeitschritt

- Zweidimensionale Wellen-, Strömungs- und Windfelder und deren Kombinationen, oder (falls nicht verfügbar)
- Zeitreihen, die leicht aus spektralen Beschreibungen gebildet werden können
- die Elastizität der Vertäuleinen und Fender durch Arbeitskurven, die im Rahmen der Software-Installation bereitgestellt werden oder von Herstellern herangezogen werden können

- die reale Schiffshülle und ihre Frequenzresonanz (Stichwort „Eigenfrequenz“).

und somit die korrekte zeitliche Abfolge der Einwirkungen und Reaktionen des Gleichgewichtssystems. Dies ermöglicht eine detaillierte Untersuchung realistischer Fälle in einzigartiger Weise. Abbildung 2 zeigt eine typische Situation, in der MIKE 21 MA angewandt wird.



Abbildung 2: Typische Anwendung von MIKE 21 MA

3. Offshore Terminal Bremerhaven

Für die Entwicklung des Hafengebietes "Fischereihafen" wird an der Weser in Bremerhaven ein neues Terminal geplant. Das Offshore Terminal Bremerhaven (OTB) liegt im Blexer Bogen in der Außenkrümmung der Weser (Abbildung 3 und 4).

Das Terminal liegt in der Nähe der Fahrrinne der Weser. Am Blexer Bogen passieren die Schiffe das geplante Terminal in geringer Entfernung, so dass

hier ein Einfluss auf vertäute Offshore Spezialschiffe entsteht. Das Ziel der Untersuchungen ist es, eine potentielle Gefährdung der vertäuten Schiffe durch den dynamischen Absink fahrender Schiffe zu ermitteln.

Das DHI Tool MIKE 21 MA in der Kombination mit dem hydrodynamischen Modul MIKE 21 HD wurde für die Untersuchungen verwendet. Die Methodik ist in Abbildung 5 dargestellt.

Optimierung von Vertäueinrichtungen und Hafenstrukturen durch dynamische Berechnung der Vertäulasten

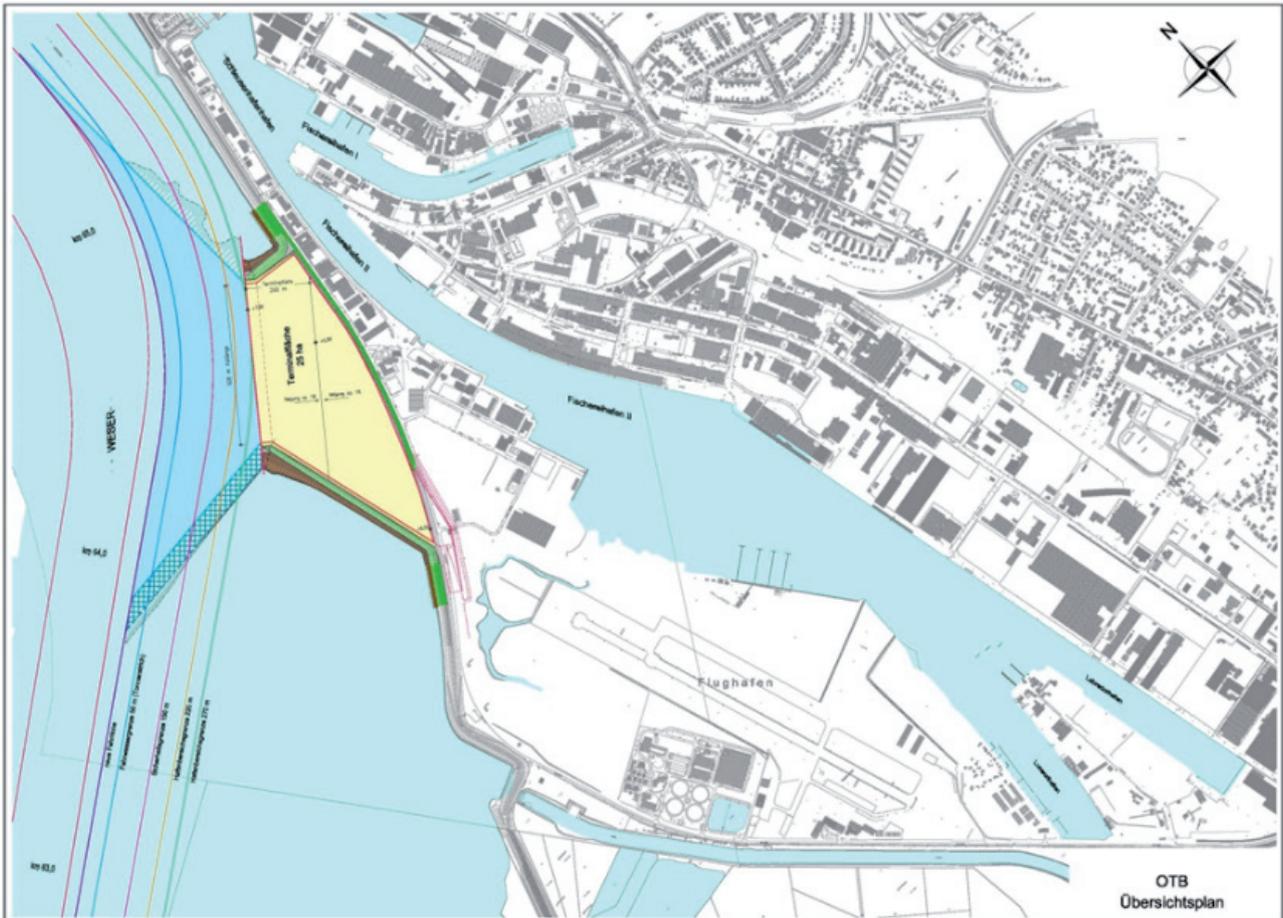


Abbildung 3: Lage des geplanten OTB im Blexer Bogen, Weser



Abbildung 4: Übersicht über das geplante Industriegebiet des OTB am Blexer Bogen

Optimierung von Vertäueinrichtungen und Hafenstrukturen durch dynamische Berechnung der Vertäulasten

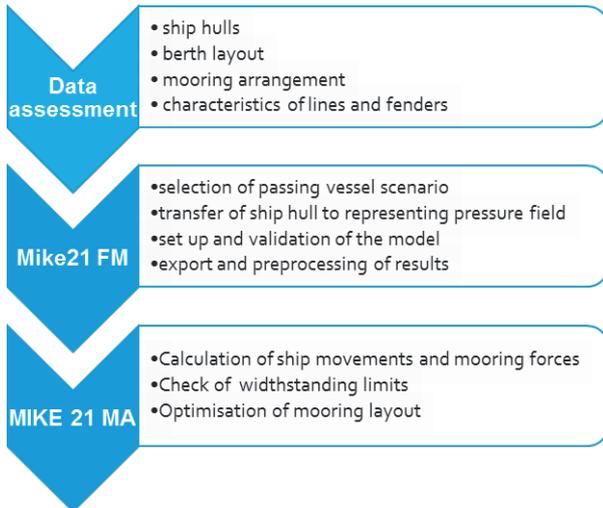


Abbildung 5: Methodik OTB am Blexer Bogen

Einen größeren Aufwand hat die Datenbeschaffung und -aufbereitung verursacht (Schiffshülle, Layout des Anlegers, Charakteristik der Vertäuung). Ein weiterer wichtiger Baustein war der Modellaufbau des MIKE 21 FM HD (Flexible Mesh, HydroDynamic Module) auf der Basis von Schiffspassagen aus nautischen Untersuchungen. Der Methodik folgend wurde die Vertäuung iterativ dem dynamischen Absunk aus der Schiffspassage angepasst und optimiert.

Empirische Gleichungen zur Bestimmung des dynamischen Absunkes und der Vertäukräfte können weder lokal unterschiedliche Wassertiefen noch den Effekt von Flusskrümmungen oder einen variablen Abstand zum Ufer berücksichtigen. Der hier gewählte Ansatz der Modellierung eines bewegten Druckfeldes in Form des Schiffsrumpfes in einem 2D Modell ermöglicht diese Betrachtungen. Das Modell verwendet dafür ein Finite Volumen Modell diskretisiert mit Dreiecken und Vierecken (DHI, 2017). In Abbildung 6 (links) ist ein Detailausschnitt des Modellnetzes in der Nähe des OTB dargestellt. Die Schiffshüllen der unterschiedlichen vorbeifahrenden Schiffe, deren Route und maximalen Geschwindigkeiten wurden in das Modellgebiet übertragen. Der Absunk und die erzeugten Wellen wurden zur Kontrolle des Modells mit Messungen entlang der Weser verglichen. Die Abbildung 6 (rechts) zeigt den Schiffsabsunk nahe des OTB.

Für die Ermittlung der für die Vertäuung am OTB kritischen Schiffspassage wurden nautische Simulationen mit Fokus auf den Abstand zum OTB, der Geschwindigkeit durch Wasser (STW) und über Grund (SOG) durchgeführt. Die größte Geschwindigkeit aus dem nautischen Modell (STW) wurde im hydrodynamischen Modell als konservative Randbedingung gewählt. Als zweiter Schritt wurden der Absunk und die zugehörigen Strömungen mit der Vertäusoftware gekoppelt.

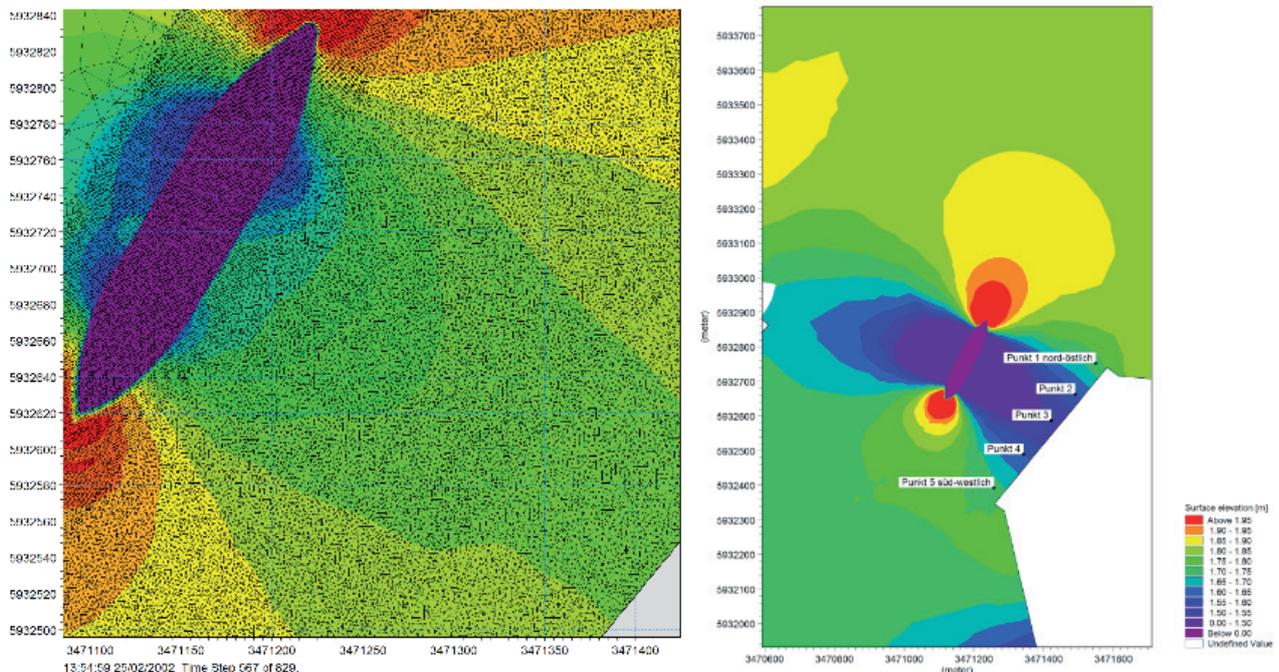


Abbildung 6: Hülle des passierenden Schiffes im Modellnetz (links) und dynamischer schiffsinduzierter Absunk vor dem OTB (rechts)

Optimierung von Vertäueinrichtungen und Hafenstrukturen durch dynamische Berechnung der Vertäulasten

Unterschiedliche Transportschiffe und Hubschiffe / Errichterschiffe wurden untersucht. Als ein Beispiel wurde das Transportschiff der P2-Klasse mit 2 Vertäueinrichtungen untersucht (Abb. 7). Die ursprüngliche Anzahl von 8 synthetischen Leinen stellte sich als nicht hinreichend heraus. Ein weiteres Setup mit

zusätzlichen 2 Spring- und 2 Vorleinen wurde untersucht. Da die Vertäueinrichtungen an Bord des Schiffes nicht ausreichend waren musste ein landgestütztes System (Shore Tension) für die Erzeugung der notwendigen Vorspannung vorgesehen werden.

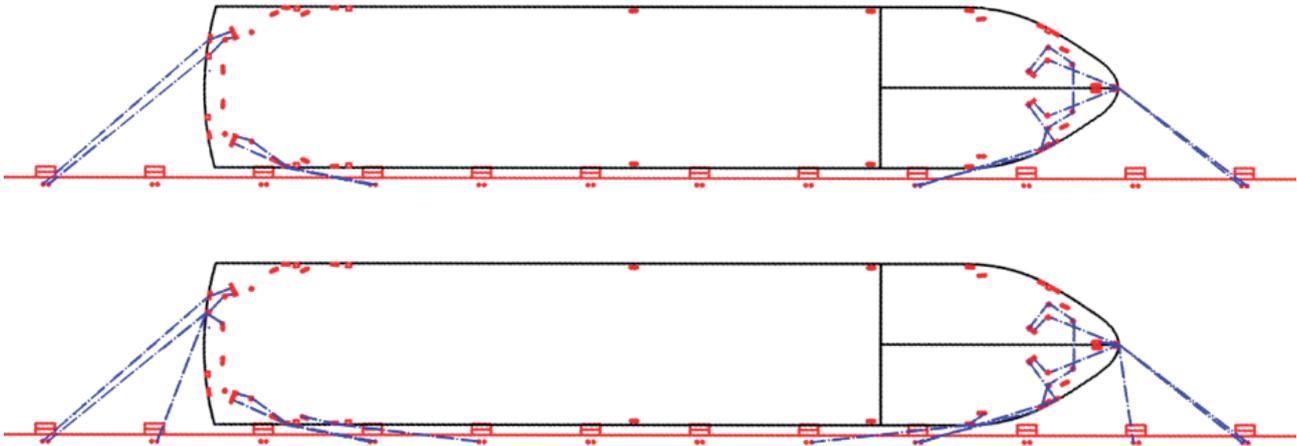


Abbildung 7: Vertäueinrichtung des Transportschiffes der P2-Klasse. Oben: ursprüngliche Vertäueinrichtung; Unten: Optimierte Vertäueinrichtung mit zusätzlichen Leinen und Shore Tension System

Die höchsten Trossenkräfte und Bruchlasten für die verwendeten Vertäuleinen sind beispielhaft in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Ergebnisse zeigten, dass in einigen Fällen die Bruchlast der Vertäuleinen durch den dynamischen Absenk überschritten und zusätzliche Vertäuleinen notwendig wurden. Die dabei auftretenden Schiffsbewegungen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Die Referenz für die maximalen Schiffsbewegungen während des Beladens wurde aus den PIANC Richtlinien (PIANC 1995) entnommen. Die Richtlinie basiert auf Erfahrungen und praktischen Untersuchungen und erlaubt eine gute Abschätzung für die hier verwendeten Ladevorgänge.

Schiffstyp	MBL [kN]	Reduzierte MBL [kN]	Max. Kraft [kN]	ursprüngliche Vertäueinrichtung
Transportschiff P2-Klasse (8 Vertäuleinen)	480	240	291	121 %
Transportschiff P2-Klasse (8 + 4 Vertäuleinen mit shore tension)	480	240	203	84 %
Ponton (mit Ballast)	990	495	144	29 %
Ponton (beladen)	990	495	280	56 %
Errichterschiff 1 (6 Vertäuleinen)	511	230	263	114 %
Errichterschiff 1 (6 Vertäuleinen + 2x Springleinen)	511	230	180	78 %
Errichterschiff 2 (12 Vertäuleinen)	850	425	277	65 %

Tabelle 1 : Maximale Trossenkräfte je Vertäuleine resultierend aus der dynamischen Lastbetrachtung. Überschreitungen der Bruchlast (MBL) sind in Rot gekennzeichnet.

Optimierung von Vertäueinrichtungen und Hafenstrukturen durch dynamische Berechnung der Vertäulasten

Schiffstyp	Wogen [m]	Schwoien [m]	Tauchen [m]	Rollen [°]	Stampfen [°]	Gieren [°]
Transportschiff P2-Klasse (8 Vertäuleinen)	4.49	0.06	0.40	1.62	0.19	0.16
Transportschiff P2-Klasse (8 + 4 Vertäuleinen mit shore tension)	2.72	0.05	0.40	0.60	0.19	0.14
Ponton (mit Ballast)	0.19	0.03	0.39	0.11	0.18	0.08
Ponton (beladen)	0.94	0.17	0.41	0.34	0.20	0.51
Errichterschiff 1 (6 Vertäuleinen)	2.40	0.12	0.40	0.21	0.21	0.40
Errichterschiff 1 (6 Vertäuleinen + 2x Springleinen)	1.58	0.12	0.40	0.13	0.19	0.32
Errichterschiff 2 (12 Vertäuleinen)	0.94	0.17	0.39	0.22	0.20	0.14

Tabelle 2 : Ergebnisse der Berechnungen für maximale Bewegungen unterschiedlicher Schiffe. Überschreitungen der Bewegungsgrenzen für Beladung sind in Rot gekennzeichnet.

Überwiegend sind die hier dargestellten Ergebnisse zu den Schiffsbewegungen deutlich geringer als die empfohlenen Grenzwerte. Lediglich das Wogen ist in einigen Fällen überschritten. Für das Transportschiff der P2 Klasse mit optimierter Vertäuerung und Shore Tension System ist es z.B. nicht möglich, die Bewegung in ein akzeptables Maß zu dämpfen. Der Grenzwert für Wogen von 2 m ist hier mit 36% überschritten. Die hier untersuchte Situation der Vorbeifahrt ist jedoch sehr selten, so dass die Verladung beim Auftreten dieser Situation unterbrochen werden kann. Die Überschreitung der Bewegungen des Errichterschiffs ist jedoch unkritisch. Voraussichtlich werden sich die Errichterschiffe während des Verladevorganges auf ihre Stützen stellen und somit unabhängig von der Vertäuerung die Verladung vornehmen. Weitere Informationen zu dem Projekt finden sich bei Brüning et al (2014).

4. Massengut-Anleger Niedersachsenbrücke, Wilhelmshave

Der Jade-Weser-Port in Wilhelmshaven verfügt über eine tiefe Zufahrt und konzentriert sich auf große Container-, Stückgut- und Massengut-Frachter. Die „Niedersachsenbrücke“ ist der Hauptanleger für den Kohleimport für das nördliche Deutschland. Der Anleger ist auf aufgeständert und befindet sich ca. 1100 m vor dem Festland. Zwei Kohlekraftwerke beziehen ihre Kohle direkt vom Anleger. Er wurde ursprünglich in den späten 60'er Jahren des vergangenen Jahrhunderts mit einem landseitigen Liegeplatz für kleine Massengutfrachter (Feeder) und einem seeseitigen Liegeplatz für Post-Panamax-Frachter von mehr als 300 m Länge geplant. Der Anleger kann außerdem für den Umschlag von ei-

nem auf das andere (simultan vertäute) Schiff verwendet werden.

Nach dem Bau des Jade-Weser-Ports nördlich der Niedersachsenbrücke wurden Änderungen am bereits bestehenden Massengut-Anleger notwendig, da sich folglich Strömungen und strömungsinduzierte Belastungen änderten. Eine erneute Bestimmung der Vertäulasten (CES, 2002) trug den statischen Lasten (aus Wind und Strömung) Rechnung. Im Rahmen einer statischen Prüfung der erwarteten operationellen Bedingungen durch WK Consult stellte sich heraus, dass sich die Lasten durch simultan vertäute Schiffe an beiden Seiten des Anlegers nahe der maximal zulässigen Belastung ergeben können. Eine vereinfachte Analyse zeigte kritische Belastungen in einigen Teilen der Konstruktion. Weiterhin waren keine Informationen zu simultan vertäuten Schiffen sowie vorbeifahrenden Schiffen verfügbar. Weitere dynamische Kräfte, z.B. durch Wellen, waren in den bisherigen Untersuchungen nicht berücksichtigt worden. Dies wurde als kritisch angesehen, vor allem im Hinblick auf zukünftige Anforderungen, nach denen zwei große Massengutfrachter simultan am Anleger vertäut werden sollen.

Um einen umfassenden und realistischen Überblick über die Vertäulasten zu bekommen, wurden durch DHI dynamische Vertäuberechnungen durchgeführt, in der die Einwirkungen aus Wind, Strömungen (aus Messungen) und vorbeifahrenden Schiffen (aus hydrodynamischen Simulationen) miteinander kombiniert wurden. Die Untersuchung wurde in Kooperation mit Manzenrieder und Partner durchgeführt, die Wasserstands- und Strömungsmessungen durchführten, und mit dem Nautischen

Optimierung von Vertäueinrichtungen und Hafenstrukturen durch dynamische Berechnung der Vertäulasten

Büro Bremen, die AIS-Daten analysierten, um eine repräsentative Schiffsvorbeifahrt simulieren zu können.

Die Schiffe, Vertäuleinen und Fender sind in Tabelle 3 beschrieben. Eine beispielhafte Vertäuanordnung ist in Abbildung 8 dargestellt.

Liegeplatz	seeseitig	landseitig
Schiffstyp	Massengutfrachter	Massengutfrachter
DWT	250,000	40.000
Länge über alles	323.5 m	220 m
Länge zwischen den Loten	310 m	210 m
Breite	52 m	28 m
Tiefgang	18.5 m	11.5 m
Beladung	75 %	100 %
Freibord	9.5 m	4.5 m
Transversale Windangriffsfläche	1600 m ²	1200 m ²
Longitudinale Windangriffsfläche	6500 m ²	4000 m ²
Vertäuleinen	HTTP	HTTP
Anzahl der Leinen	16	12
Durchmesser	72	60
Minimale Bruchlast	84 t	60 t
Fender	Super Cone SCN 1100	Zylinderfender 2000x1200
Maximale Reaktionskraft	2348 kN	2000 kN
Maximale Zusammendrückung	1.65 m	1.2 m

Tabelle 3: Schiffparameter (Voss, 2008; Albrecht 2011; CES, 2011; Salzgitter Consult, 1989)

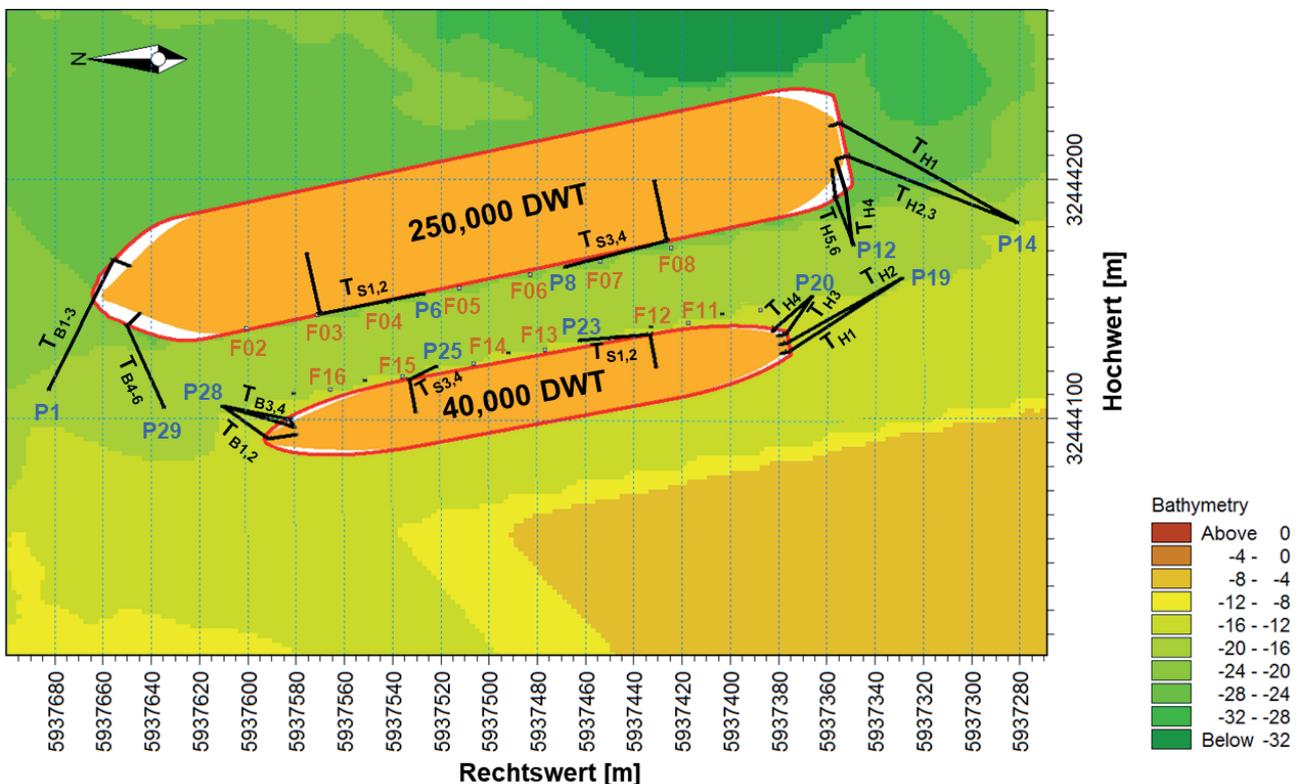


Abbildung 8: Beispielhafte Vertäuanordnung an der Niedersachsenbrücke in Wilhelmshaven (Koordinaten in ETRS 1989 UTM 32N), "F" = Fender, "P" = Poller, "T" = Vertäuleine (nach Albrecht, 2011).

Optimierung von Vertäueinrichtungen und Hafenstrukturen durch dynamische Berechnung der Vertäulasten

Es wurde eine Untersuchungsmatrix bestehend aus 22 Szenarien gebildet. Die Szenarien beinhalten Kombinationen aus Wind, Strömung, Wellen und vorbeifahrenden Schiffen. Die Auswertung der AIS-Daten ergab einen minimalen Passierabstand von 200 m (ankommend). Für die Schiffsvorbeifahrt wurde ein 166,7 m langer und 25 m breiter Massengutfrachter mit 14 m Tiefgang und einer Geschwindigkeit von 8 Knoten (Meyer, 2017) angesetzt. Die Methodologie entsprach dabei der in Abbildung 4 dargestellten.

Die kritischsten Umweltbedingungen stellten Westwind mit Geschwindigkeiten von 32,4 m/s, Wellen mit einer signifikanten Höhe von $H_s = 1,6$ m und einer Peak-Periode von $T_p = 4,5$ s aus Ost-Nordost sowie Ebbströmung mit einer Geschwindigkeit von $u = 0,9$ m/s dar. Die Wind-induzierten Wellen wurden mit langperiodischen Wellen mit $H_s = 0,5$ m und $T_p = 12$ s aus Nord kombiniert. Die Wellen wurden durch Streu-Analysen von Zeitreihen ermittelt, die aus dem Northern Europe Hindcast (1979-2016) von DHI extrahiert wurden. Die Daten sind von <https://www.metocean-on-demand.com/> verfügbar.

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen wurden die folgenden Schlussfolgerungen gezogen:

- Die höchsten Lasten treten in den Spring-Leinen auf, während die Tideströmung auf das Schiffsheck zuläuft
- Die Wellenbelastung ist aufgrund der kurzen Perioden der Windinduzierten Wellen sowie der Anlegerausrichtung klein, woraus sich auch ein kleiner Anlaufwinkel für die langperiodischen Wellen ergibt
- Die höchsten Pfahlzugkräfte treten bei Westwind am äußeren Anleger auf (ähnlich wie bei den vorangegangenen Studien)
- Die zu erwartenden Kräfte aus Schiffsvorbeifahrt sind klein.

Es konnte bestätigt werden, dass die Konstruktion des Massengutanlegers Niedersachsenbrücke sichere Vertäubedingungen für die untersuchten Schiffe unter den geänderten Strömungsbedingungen und dynamischen Bedingungen infolge Wellen und Schiffsvorbeifahrt bietet. Es waren keine baulichen Änderungen des Anlegers erforderlich.

5. Großschiffswarteplatz Finkenwerder Pfähle, Hamburg

Bereits seit mehreren Jahren dienen die Finkenwerder Pfähle als Warteplatz für zumeist tideabhängige Großschiffe, die den für sie vorgesehenen Liegeplatz zwischenzeitlich nicht anlaufen kön-

nen. Er befindet sich im Bereich der Hafenzufahrt in Hamburg Finkenwerder und ist am Rande der Fahrrinne als vom Ufer losgelöster Dalbenliegeplatz ausgeführt. Ursprünglich für Panmax Schiffe entworfen, plant die Hamburg Port Authority (HPA) diesen Warteliegeplatz für die gestiegenen Dimensionen der aktuellen und zukünftigen großen Containerschiffe (ULCS) zu ertüchtigen. Hierbei wurden folgende Überlegungen berücksichtigt:

- Neuauslegung der Anlage für Bulker mit mind. 250 m und der nächsten Generation der ULCS (bis 450 m)
- Weiterverwendung der vorhandenen Pfähle
- Maßgeblich Berücksichtigung der Windlasten aufgrund gesteigener Windangriffsflächen. Die resultierenden Kräfte wurden in Windkanalversuchen für unterschiedliche Beladungszustände der ULCS ausgewertet
- Untersuchung verschiedener Vertäukonfigurationen für die ULCS
- Bewertung der Fenderkräfte an bestehenden Anlegedalben für auflandige Windsituationen
- Verbesserte Nutzung des bestehenden Liegeplatzes durch ergänzende Dalben.

Der Ansatz gängiger Normen und Richtlinien (z.B. EAU 2012) hätte zu einer Überbemessung der Lasten geführt und eine große Anzahl an zusätzlichen Dalben erfordert. Da die Warteliegeplätze hauptsächlich von ULCS genutzt werden, spielen Wind und Strömung eine wichtige Rolle bei der Bemessung. Aus diesem Grund entschied die HPA das dynamische Vertäuprogramm von DHI zu verwenden, um die operationellen Grenzen des bestehenden Dalbenliegeplatzes zu ermitteln und einem Schaden der Infrastruktur durch Überlastung vorzubeugen. Zusätzlich wurden anhand einer auf den dynamischen Berechnungen aufbauenden Variantenuntersuchung ergänzende Dalben zur Abdeckung kritischer Lastsituationen positioniert.

5.1 Ausgangssituation

Aufgrund seiner begrenzten Länge ist aktuell die Vertäuerung von ULCS am Großschiffsliegeplatz nur eingeschränkt möglich. Pro Liegeplatz stehen nur zwei Vertäudalben zur Verfügung, die die Bug- und Heckleinen von Schiffen mit einer LÜA von 400 m aufnehmen können. Wegen der begrenzten Anzahl an Vertäuhaken, jeweils 4 Stück pro Dalben, können nur 4 Vorder- bzw. Heckleinen und je 2 Springleinen ausgebracht werden (siehe Abbildung 9). Generell ist die Vertäuerung der ULCS jedoch darauf ausgelegt, mindestens mit 6 Vorder- bzw. Heckleinen festzumachen.

Optimierung von Vertäueinrichtungen und Hafenstrukturen durch dynamische Berechnung der Vertäulasten

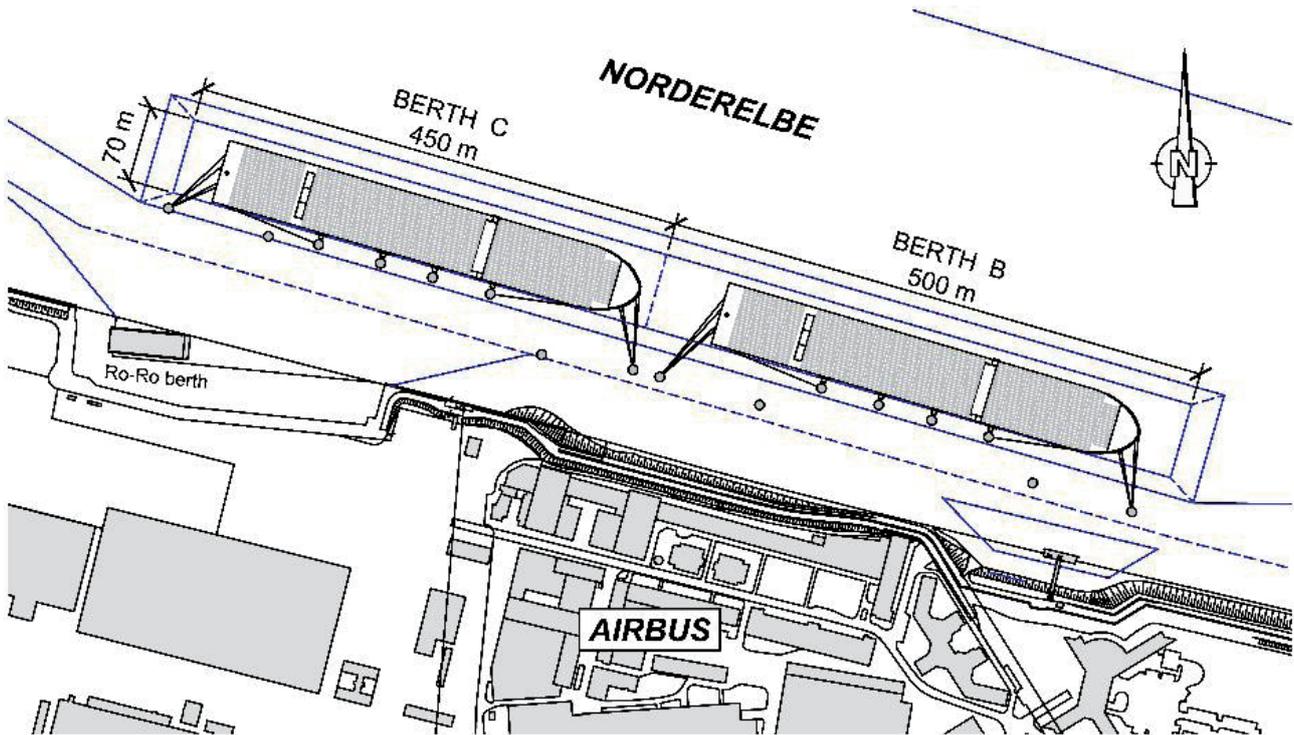


Abbildung 9: Bestehende Festmacherdalben in Finkenwerder, Hamburg

5.2 Randbedingungen

Zu Beginn wurden die in die Berechnung einfließenden Parameter für eine Erweiterung der Festmacherdalben definiert. Diese sind durch die Landebahn sowie dem Ro-Ro-Anleger des nahegelegenen Airbusgeländes geometrisch begrenzt. Die Höhe und Abmessungen der neu geplanten Dalben (Länge/ Durchmesser) müssen sich an denen der vorhandenen Dalben orientieren.

Für die Berechnung der Vertäukräfte an den Liegeplätzen wurden vier Bemessungsschiffe definiert. Hierbei ist die Größenentwicklung der Containerschiffe in den letzten Jahren berücksichtigt worden: kleinere Feederschiffe (8.000 TEU, LüA = 335 m); aktuelle Containerschiffgrößen (15.000 - 19.000 TEU, LüA = 400 m) und zukünftige ULCS - Klassen bis 24.000 TEU (LüA = 450 m).

Die lokalen, richtungsabhängigen Windgeschwindigkeiten wurden durch den Deutschen Wetterdienst in einem Windgutachten ermittelt. Es enthält eine statistische Analyse der 2%-igen Überschreitungswahrscheinlichkeit (50-Jahreswind) in einer Höhe von 10 m über dem Boden. Die Diskretisierung des Windsektors betrug 30°.

Im Flächenschwerpunkt der Bemessungsschiffe wurde eine höhengemittelte Windgeschwindigkeit angesetzt. Dabei betrug die durchschnittliche Höhe über der Wasserlinie (HüWL) 64 m. Abweichungen zwischen den unterschiedlichen Bemessungsschiffen hatten hier keinen signifikanten Einfluss auf die ermittelten Windlasten (< 3 %). Die der Berechnung zugrunde gelegten Windgeschwindigkeiten sind in Tabelle 4 aufgeführt. Der lokale Abschattungseffekt der Airbus Gebäude auf den Dalbenliegeplatz B ist an den geringeren Windgeschwindigkeiten für die südwestlichen Sektoren 120° - 270° zu erkennen.

Richtung		30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	360°	0°-360°
LP B ¹⁾	V _{w,2%} [m/s]	22,1	25,6	27,9	15,1	11,6	13,9	22,1	23,2	32,5	33,7	17,4	15,1	34,9
	V _{w,2%} [m/s]	22,1	25,6	27,9	20,9	16,3	18,6	27,9	32,5	33,7	33,7	17,4	15,1	34,9

1) LP B = Liegeplatz B; 2) LP C = Liegeplatz C

Tabelle 4: Lokale, höhengemittelte Windgeschwindigkeiten (m/s) mit einer Wiederkehrperiode von 50 Jahren (30° Sektoren, Durchschnittshöhe der Bemessungsschiffe 64 m).

Optimierung von Vertäueinrichtungen und Hafenstrukturalen durch dynamische Berechnung der Vertäulasten

Tabelle 5 zeigt die Mindestanforderungen für Leinen und Winden. Die hier angegebenen Werte basieren

auf einer Umfrage der Hamburger Hafenlotsen und den Erfahrungen des Oberhafenamtes.

Bezeichnung	Bulker	Handy New Panamax	New Panamax	Post New Panamax	Post New Panamax Plus ²⁾
Schiffstyp	Bulker	Container	Container	Container	Container
Baujahr (ab)	-	2000	2008	2006	ZUKUNFT
DWT/ TEU	230.000 t	8.000-12.000	12.001-14.500	14.501-21.500	21.501 +
Material der Leinen ¹⁾	PP/PE oder PA	PP/PE oder PA	PP/PE oder PA	PP/PE oder PA	PP/PE oder PA
min. Leinenanzahl (ausgelegt)	12 (4,2 vertäut)	8 (3,1 vertäut)	12 (4,2 vertäut)	16 (6,2 vertäut)	22 ³⁾ (8,3 vertäut)
Minimum Breaking Load MBL	siehe New Panamax	90 t	110 t	130 t	150 t
zul. Regelbeanspruchung PA =45% / PP/PE =50%	siehe New Panamax	40,5 t / 45 t	49,5 t / 55 t	58,5 t / 65 t	67,5 t / 75 t
SWL Winden (≈ min MBL)	siehe New Panamax	90 t	110 t	130 t	150 t
Designlast Bremse (≈ 80% MBL)	siehe New Panamax	72 t	88 t	104 t	120 t

1) PP/PE = Polypropylene/ Polyester; PA = Polyamid (Nylon)

2) Werte basieren auf Grundlage von [4] und Abschätzungen

3) Annahme auf Basis einer Lastabschätzung

Table 5: Mindestanforderungen der Leinen und Winden für die ausgewählten Bemessungsschiffe

Gewählte Bemessungsparameter für die Vertäube-rechnung

Es wurde angenommen, dass standardmäßig 16 Nylonleinen beim Festmachen ausgebracht werden (6-2-Vertäuung). Die Bruchlast (MBL) der Festmacherleinen liegt mit 150 t über dem Mindestwert von 130 t. Die Safe Working Load (SWL) einer Mooringwinde entspricht in der Regel der MBL der verwendeten Leinen.

Als zulässige Leinenspannung bei Nylonleinen wurden 45 % der MBL angesetzt. Dies entspricht 67,5 t für eine Einzelleine bzw. 135,0 t für eine Doppelleine.

Aufgrund der vorgegebenen Bemessungssituation (Sturm) ist davon auszugehen, dass diese Grenzwerte für die Leinen nicht eingehalten werden. Da im Sturmfall vorgegeben wird die Winden „auf Bremse“ anstatt im Automatikbetrieb zu fahren, sollten andere Grenzwerte als die empfohlene Regelbeanspruchung der Leinen herangezogen werden.

Für die Einordnung der Ergebnisse wurde in der Auswertung als Grenzwert 80% der minimalen Bruchlast (MBL) der Leinen angenommen, um bei einer angestrebten Belegung „auf Bremse“ noch 20% Reserve im Reck der Leinen zu haben. Für das 19.000 TEU-Schiff wurde abweichend ein Grenzwert entsprechend der Designlast der Windenbremse von 120 t x 80 % = 96 t (bzw. 192 t bei Doppelwinden) angesetzt. Dieser Grenzwert deckt sich mit der Designlast der bestehenden Sliphaken von 1.000 kN (= 100 t) je Haken. Zudem entspricht die Designlast der Windenbremse (96 t) bezogen auf die angegebene MBL von 150 t einem Ausnutzungsgrad von 64 %. Somit ist in den Leinen eine Lastreserve von min. 36% vorhanden.

5.3 Handlungsempfehlung

Aus den Untersuchungen ergaben sich folgende Handlungsempfehlungen für den Betrieb der Liegeplätze B und C des Großschiffswartepplatzes Finckenwerder:

Optimierung von Vertäueinrichtungen und Hafenstrukturen durch dynamische Berechnung der Vertäulasten

1. Ab einer Windstärke von 6 Bft. ist mit zunehmend starken Bewegungen des Schiffes zu rechnen. Diese Information ist an die Kapitäne weiterzugeben.
2. Zusätzliche Leinen können für den Sturmfall auf Pollern an Deck belegt werden. Dies stellt nur eine Übergangslösung dar und ist mit entsprechender seemännischer Sorgfalt durchzuführen, da die Leinen mit Hilfe des Spillkopfes „manuell“ durchgeholt und gefiert werden müssen. Erfolgt dies nicht, können bei variierender Tide Leinen zu lose fallen oder unter hoher Spannung stehen. Dies führt zu einem ungleichmäßigen und ungünstigen Tragverhalten der Leinen.
3. Sollten Schiffe nicht ausreichende Leinen (Anzahl oder MBL) mit sich führen oder aufgrund der entstehenden Schiffsbewegungen Unsicherheit bestehen, ist im Zweifelsfall ab einer Windstärke 8 aus süd- bis südwestlichen Richtungen von den verantwortlichen Kapitänen eine Schlepperassistenz anzufordern, damit eine Überschreitung des Ausnutzungsgrads der Leinen von 80% MBL nicht eintritt.

5.4 Zusammenfassung der Ergebnisse Finkenwerder Pfähle

IST-Situation

Die Ergebnisse der Vertäustudie zeigen, dass die bestehende Anlage der Finkenwerder Pfähle bereits für die aktuellen Schiffsgenerationen mit einer Schiffslänge von 400 m nicht ausreichend dimensioniert ist. Die mitgeführten 6 bis 8 Vor- bzw. Achterleinen können aus geometrischen Gründen nicht auf den vorhandenen Dalben festgemacht werden.

Hierdurch fehlen in der IST – Situation aktuell mind. zwei Vertäudalben.

Die Auswertung der Leinenlasten und Dalbenkräfte zeigen, dass für die Bestandssituation mit Abschattungseffekten der Airbushallen am Liegeplatz B die 4,2 Vertäuung eines 19.000 TEU Schiff ausreicht, um es im Sturmfall zu halten. Ebenso werden die zul. horizontalen Lasten am Dalbenkopf von rd. 3.000 kN nicht überschritten. Bei ablandigem Wind ab einer Stärke von 6 Bft kann der Kontakt mit den Anlegedalben verloren gehen.

Für den angesetzten Bemessungswind ohne Abschattungseffekte der Airbushallen ist die 4,2 Vertäuung eines 19.000 TEU Schiff an beiden Liegeplätzen nicht ausreichend. Die ausgebrachten Leinen überschreiten deutlich die angesetzte Dauerbeanspruchung von 45 %-MBL und erreichen zum Teil sogar die MBL. Ebenso werden die horizontalen Lasten am Dalbenkopf verdoppelt (rd. 6.000 kN). Die horizontalen Schiffsbewegungen (Wogen, Schwoien und Gieren) erreichen unakzeptable Werte (Schwoien von rd. 8 m).

Ausbau für 400 m Schiffe

Die Vorzugsvarianten für beide Liegeplätze zeigen, dass im Falle einer Neubemessung ohne Windabschattung für das 19.000 TEU-Schiffe an beiden Liegeplätzen zwei bzw. drei zusätzliche Vertäudalben vorzusehen sind, um ein Festmachen mit einer 8-2-Vertäuung (bzw. 6-2-Vertäuung am Liegeplatz B) im Sturm zu gewährleisten, siehe Abbildung 10. Alle Dalben sind für eine zul. horizontale Last von circa 3.500 kN zu bemessen.

Optimierung von Vertäueinrichtungen und Hafenstrukturen durch dynamische Berechnung der Vertäulasten

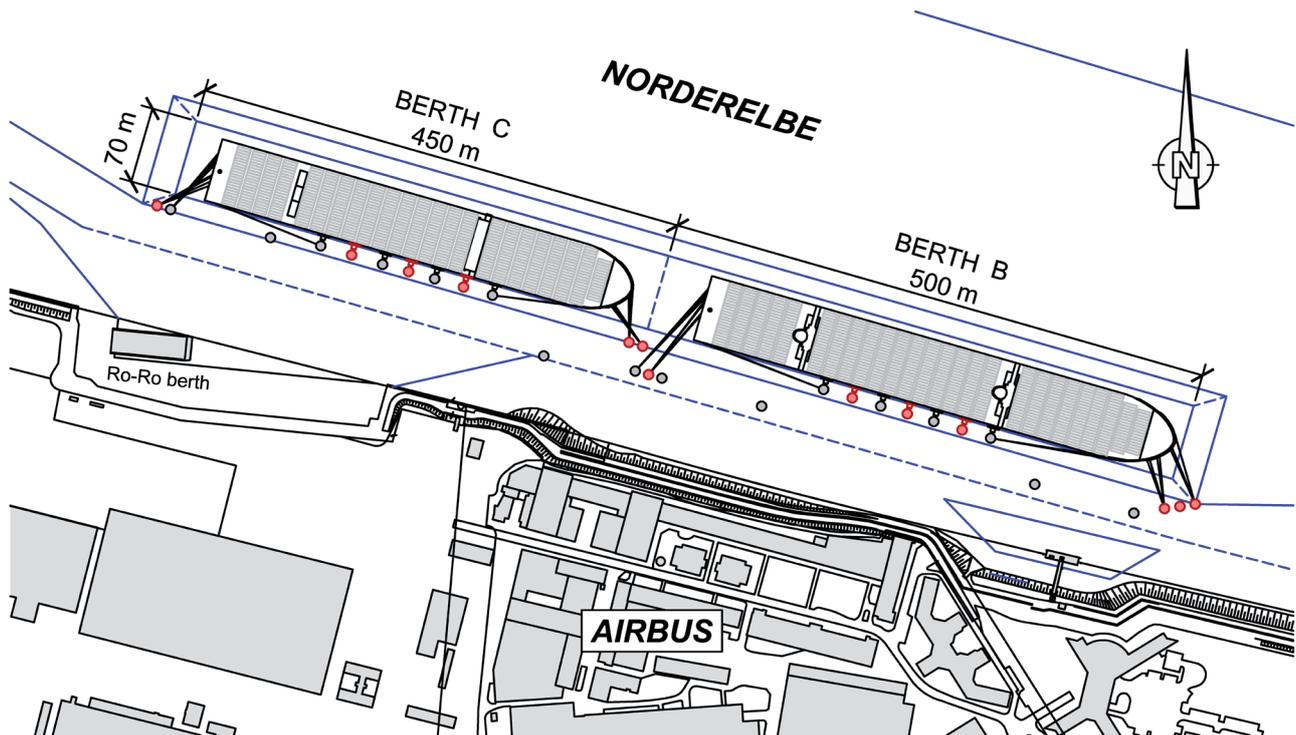


Abbildung 10: Ergänztes Layout der Liegeplätze in Finkenwerder, Hamburg

Die Lasten der Springleinen auf die Poller der Anlegedalben überschreiten den zulässigen horizontalen Zug pro Dalben zu keiner Zeit. Das Anlegesystem (Fender und Dalbenfederung) kann für Schiffe bis 400 m Länge Winddruckkräfte von 2800 kN aufnehmen. Aufgrund der ergänzten Anlegedalben sind Lastreserven vorhanden und es kommt zu einer Umlagerung der Auflagerlasten. Zudem begünstigen diese zusätzlichen Anlegedalben die „Liesituation“ für Containerschiffe mit kleinen Anlegeflächen.

Die überschlägliche Lastermittlung für die weiteren Bemessungsschiffe hat bestätigt, dass kleinere Schiffe (Bulkler, Handy New Panamax), die per se eine geringere Windangriffsfläche haben und weniger Leinen mitführen, nicht Bemessungsrelevant sind. Im Sturmfall können diese auch mit einer geringeren Anzahl an Leinen festgemacht werden (z.B. 4-2-Vertäuung). Hierbei ist darauf zu achten, dass die verwendeten Leinen die auftretenden Lasten abtragen können.

Zukünftige Schiffsgenerationen – Abschätzung wurde durch Berechnung bestätigt

Für die zukünftige Schiffsgeneration (Post New Panamax Plus – Beispielschiff „Tomorrow“) mit Windangriffsflächen über 20.000 m² werden die Lasten in den Leinen und an den Vertäudalben vereinfacht angenommen um ca. 30 % steigen. In diesem Fall ist davon auszugehen, dass das Schiff mindestens mit einer 8-3-Vertäuung festgemacht wird.

Nachrechnungen für das 24.000 TEU Schiff bestätigen die oben genannten überschläglichen Werte. Aufgrund der Überschreitung der zul. Horizontallasten am ersten Dalben des Liegeplatz B ist für den Fall eines Ausbaus für Schiffe mit einer LoA > 400 m mindestens ein weitere Vertäudalben einzuplanen. Dies ist auch im Hinblick auf die voraussichtlich steigende Leinenanzahl (ca. 12 4 Vertäuung) zu berücksichtigen.

Die voraussichtliche Steigerung der Leinenanzahl aufgrund der Schiffsgrößenentwicklung wird, wie in Tabelle 5 dargestellt, auch zu einer Erhöhung der MBL der verwendeten Leinen führen. Wie die Ergebnisse der dynamischen Berechnung gezeigt haben, wird dies die bestehenden Sliphaken an die Grenze ihrer Gebrauchslast bringen.

Durch die dargestellte Herangehensweise wurde ein kompletter Ersatzneubau vermieden.

6. Zusammenfassung

Dieser Artikel fasst drei Anwendungen dynamischer Vertäuanalysen zusammen, bei denen die Sicherheit von Liegeplätzen neu bewertet wurde, um Schiffsgrößen und –formen die nicht in Richtlinien behandelt werden, sicher zu vertäuen. Der mathematische Hintergrund wird kurz beschrieben und die wichtigsten Annahmen werden umrissen. Das Beispiel dynamischer Vertäuanalysen für das Offshore-Terminal Bremerhaven zeigte die Fähigkeit der angewandten Methoden, die Auswirkungen von

Optimierung von Vertäueinrichtungen und Hafenstrukturalen durch dynamische Berechnung der Vertäulasten

vorbeifahrenden Schiffen in beengten Gewässern zu bewerten. In Wilhelmshaven wurde eine bestehende Pfeilerstruktur unter wechselnden Bedingungen und zusätzlich unter dynamischen Wellenlasten erneut analysiert und optimiert. Im Vergleich zu statischen Methoden überprüfte die detailliertere dynamische Methode die Sicherheit der vorhandenen Strukturen auch unter dynamischen Bedingungen. Empfehlungen für mehr Sicherheit wurden abgeleitet. In Hamburg wurde die Methode auf die größten Containerschiffklassen angewendet. Die Analyse ergab notwendige Änderungen am bestehenden Liegeplatz. Darüber hinaus wurden Handlungsempfehlungen für den Betrieb gegeben.

In allen Anwendungen führen dynamische Vertäuanalysen zu einem besseren Verständnis der Prozesse, was in der Folge weniger konservative Konstruktionen ermöglicht. Dadurch kann das angewandte Verfahren zu einer verbesserten Sicherheit bei der Vertäuerung und reduzierten Baukosten an den Liegeplätzen führen.

7. Referenzen

- Albrecht, H. (2011): "Niedersachsenbrücke in WHV. Neue Slipgeschirre P30 und P31 auf der Umschlagbrücke. Nachweise der Vertäusysteme"
- Babarit, A., Delhommeau, G. (2015): "Theoretical and numerical aspects of the open source BEM solver NEMOH" LHEEA CNRS UMR 6598, Ecole Centrale de Nantes, France.
- Bingham, H.B. (2000): "A hybrid Boussinesq-panel method for predicting the motion of a moored ship", Coastal Engineering, 40., 21-38.
- Brüning, A., Stoschek, O., Spinnreker, D., Kraus, U. (2014): „Assessing mooring forces at an offshore wind terminal, Bremerhaven, Germany“, PIANC World Congress, San Francisco, USA.
- CES (2002): "Gutachterliche Stellungnahme zu Vertäusystemen für Massengutfrachter der 190.000 dwt-Klasse", in co-operation with tewis AG.
- DHI (2017): „MIKE 21 Flow Model & MIKE 21 Flood Screening Tool-Hydrodynamic Module, Scientific Documentation“, Hørsholm, Denmark.
- DHI (2018): "MIKE 21 Maritime – Frequency Response Calculator and Mooring Analysis, Scientific Documentation“, Hørsholm, Denmark, (in review).
- EAU (2012): "Empfehlungen des Arbeitsausschusses Uferneinrichtungen: Hafen und Wasserstraßen", 11th Edition, Ernst & Sohn.
- Meyer, M. (2017): "Nautische Einschätzung Nr. 12102417", Nautisches Büro Bremen, March 2017.
- Newman, J.N. (1977): "Marine Hydrodynamics" MIT Press, Cambridge, MA, USA.
- PIANC (1995): „Criteria for Movements of Moored Ships in Harbours, A Practical Guide" Report of Working Group no. 24, Supplement to Bulletin no. 88, 1995.
- Salzgitter Consult (1989): "Studie über den Ausbau der Niedersachsenbrücke in Wilhelmshaven zur Abfertigung von vollabgeladenen Massengutfrachtern bis 250.000 dtw Tragfähigkeit", November 1989.
- Voss, L. (2008): „Statische Berechnung. Verbundwand Niedersachsenbrücke Teil 1: Grundlagen und Schnittgrößenermittlung für die Spundwand.“